

УДК 54.04; 546; <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2024-6.19>

<https://orcid.org/0000-0001-9622-5164>

<https://orcid.org/0000-0002-1744-3647>

<https://orcid.org/0000-0001-9464-5317>

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ СОРБЕНТОВ MgO/5A И Na₂O/5A



М.М. АНИСОВА¹,
PhD, ведущий научный
сотрудник,
telbaeva.moldir@yandex.kz



М.М. МАМБЕТОВА^{1,2},
PhD, старший научный
сотрудник,
mambetova_manshuk@list.ru



Г.Е. ЕРГАЗИЕВА^{1,2},
кандидат химических наук,
профессор, главный
научный сотрудник,
ergazieva_g@mail.ru

¹ЦЕНТР ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗА,
НАО «КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. АЛЬ-ФАРАБИ»
Республика Казахстан, Алматы, 050040, пр. аль-Фараби, 71

²РГП НА ПХВ «ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ГОРЕНИЯ»
Республика Казахстан, Алматы, 050012 ул. Богенбай батыра 172

В данном исследовании изучены физико-химические характеристики и сорбционные свойства композитных сорбентов на основе цеолита 5A, модифицированных оксидом магния (MgO) и оксидом натрия (Na₂O), в процессе адсорбции диоксида углерода (CO₂). Сорбенты были синтезированы методом капиллярной пропитки с различным содержанием активных компонентов (5, 10 и 15 мас. %). Исследование показало, что наибольшая сорбционная емкость достигается при содержании 10 мас. % MgO (27,3%) и 10 мас. % Na₂O (23,4%) при температуре адсорбции 500 °С. Методы рентгенофазового анализа (РФА) и инфракрасной спектроскопии (ИКС) подтвердили образование карбонатных фаз (MgCO₃ и Na₂CO₃) после сорбции CO₂, а также изменение структурных характеристик сорбентов. Изучение циклической стабильности продемонстрировало снижение сорбционной емкости после 10 циклов: для 10 мас. % MgO/5A с 27,3% до 26,0%, для 10 мас. % Na₂O/5A с 23,4% до 17,8%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сорбенты, адсорбция, диоксид углерода, улавливания, цеолиты.

МgO/5А ЖӘНЕ Na₂O/5А КОМПОЗИТТИ СОРБЕНТТЕРДІҢ ФИЗИКАЛЫҚ-ХИМИЯЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН ЖӘНЕ СОРБЦИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

М.М. АНИСОВА¹, PhD, ведущий научный сотрудник, telbaeva.moldir@yandex.kz
М.М. МӘМБЕТОВА^{1,2}, PhD, старший научный сотрудник, mambetova_manshuk@list.ru
Г.Е. ЕРҒАЗИЕВА^{1,2}, Кандидат химических наук, профессор, главный научный сотрудник, ergazieva_g@mail.ru

¹ФИЗИКО-ХИМИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУЛЕР ЖӘНЕ ТАЛДАУ ӘДІСТЕРІ ОРТАЛЫҒЫ,
 «ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ» КЕАҚ
 Қазақстан Республикасы, Алматы қ., 050040, әл-Фараби д-ы, 71

²«ЖАНУ ПРОБЛЕМАЛАРЫ ИНСТИТУТЫ» ШЖҚ РМК
 Қазақстан Республикасы, Алматы қ., 050012 Бөгенбай батыр к-сі, 172

Бұл жұмыста көмірқышқыл газының (CO₂) адсорбциясы процесінде 5А цеолиті негізді магний оксидімен (MgO) және натрий оксидімен (Na₂O) модификацирленген композициялық сорбенттердің физика-химиялық сипаттамалары мен сорбциялық қасиеттерін зерттеді. Сорбенттер капиллярлық сіңдіру әдісімен белсенді компоненттердің мөлшерін өзгерте отырып (5, 10 және 15 мас.%) синтезделді. Зерттеулер көрсеткендей, ең жоғары сорбциялық сыйымдылық 10 мас.% MgO (27,3%) және 10 мас.% Na₂O (23,4%) құрамында 500 °С температурада адсорбция кезінде байқалды. Рентгенқұрылымдық талдау (РҚТ) және инфракызыл спектроскопия (ИКС) әдістері CO₂ сорбциясынан кейін карбонатты фазалардың (MgCO₃ және Na₂CO₃) түзілуін, сондай-ақ сорбенттердің құрылымдық сипаттамаларының өзгеруін растады. Циклдік тұрақтылықты зерттеу 10 циклден кейін сорбциялық сыйымдылықтың төмендеуін көрсетті: 10 мас.% MgO/5А үшін 27,3%-дан 26,0%-ға дейін, ал 10 мас.% Na₂O/5А үшін 23,4%-дан 17,8%-ға дейін.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: сорбенттер, адсорбция, көмірқышқыл газы, ұстау, цеолиттер.

INVESTIGATION OF THE PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND ADSORPTION PROPERTIES OF MgO/5A И Na₂O/5A COMPOSITE SORBENTS

М.М. ANISSOVA¹, PhD, Leading Researcher, telbaeva.moldir@yandex.kz
М.М. MAMBETOVA^{1,2}, PhD, Senior Researcher, mambetova_manshuk@list.ru
G.E. YERGAZIYEVA^{1,2}, Candidate of Chemical Sciences, Professor, Chief Researcher, ergazieva_g@mail.ru

¹CENTER OF PHYSICAL CHEMICAL METHODS OF RESEARCH AND ANALYSIS,
 AL-FARABI KAZAKH NATIONAL UNIVERSITY
 Al-Farabi av., 71, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan

²INSTITUTE OF COMBUSTION PROBLEMS
 Bogenbai Batyr str., 172, Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan

This study investigates the physicochemical properties and sorption characteristics of composite sorbents based on 5A zeolite, modified with magnesium oxide (MgO) and sodium oxide (Na₂O), in the process of carbon dioxide (CO₂) adsorption. The sorbents were synthesized via a capillary impregnation method with varying active component contents (5, 10, and 15 wt.%). The

findings revealed that the highest sorption capacity was achieved with 10 wt.% MgO (27.3%) and 10 wt.% Na₂O (23.4%) at an adsorption temperature of 500 °C. X-ray phase analysis (XRD) and infrared spectroscopy (IR) confirmed the formation of carbonate phases (MgCO₃ and Na₂CO₃) after CO₂ sorption, along with changes in the structural properties of the sorbents. The cyclic stability study demonstrated a decrease in sorption capacity after 10 cycles: from 27.3% to 26.0% for 10 wt.% MgO/5A, and from 23.4% to 17.8% for 10 wt.% Na₂O/5A.

KEY WORDS: sorbents, adsorption, carbon dioxide, capture, zeolites.

Введение. Диоксид углерода (CO₂) является основным парниковым газом, который значительно способствует глобальному потеплению и изменению климата [1]. Снижение выбросов CO₂ стало одной из ключевых глобальных задач, поскольку для ограничения повышения глобальной температуры ниже 2°C, как это предусмотрено Парижским соглашением, критически важно использовать технологии улавливания и хранения углерода (CCS) [2]. Согласно большинству моделей устойчивого развития, достижение указанных климатических целей невозможно без внедрения технологий CCS, которые включают три основных этапа: улавливание, транспортировку и хранение CO₂. При этом этап улавливания CO₂ является наиболее технологически сложным и затратным [3]. Высокая стоимость и сложность технологии остаются основными барьерами для её широкого промышленного применения. Среди доступных методов CCS химическая абсорбция занимает лидирующую позицию, благодаря своей промышленной зрелости и относительной экономической осуществимости. Однако этот подход сопровождается рядом проблем, включая высокие энергетические затраты, сложность регенерации сорбента, токсичность применяемых материалов и риск вторичного загрязнения [4]. В связи с этим значительное внимание уделяется разработке альтернативных методов разделения, таких как физическая абсорбция, криогенное разделение, кислородно-топливное сжигание, мембранные технологии и адсорбция [5].

Метод адсорбции, основанный на поверхностных взаимодействиях, привлекает внимание исследователей благодаря ряду преимуществ, включая доступность исходных материалов, простоту регенерации и высокую экономическую эффективность [6-8]. Тем не менее, эффективность адсорбции во многом зависит от разработки сорбентов, которые обладают высокой сорбционной ёмкостью, стабильностью и низкой стоимостью. В качестве адсорбентов для улавливания CO₂ изучаются различные материалы: активированный уголь, углеродные нанотрубки, графеновые структуры, полимеры, молекулярные сита, цеолиты, металлоорганические каркасы (MOF) и оксиды металлов [9,10]. MOF характеризуются высокой стоимостью и сложностью производства в промышленных масштабах, а материалы на основе углерода теряют сорбционную емкость при высоких температурах [11]. Среди них цеолиты обладают упорядоченной пористой структурой, высокой удельной поверхностью и активными центрами, что делает их перспективными для улавливания CO₂. Однако эффективность цеолитов может снижаться в присутствии влаги или примесей, что ограничивает их применение в реальных условиях. Для преодоления этих ограничений разрабатываются методы модификации цеолитов щелочными и щелочноземельными металлами, что позволяет значительно улучшить их адсорбционные свойства [13]. Модификация оксидами щелочных и щелочноземельных металлов

увеличивает электронную плотность кислорода в каркасе цеолита, что усиливает взаимодействие с молекулами кислот Льюиса, таких как CO_2 [14–15]. Такие модифицированные материалы демонстрируют большую устойчивость к циклическому использованию и более высокую сорбционную емкость по сравнению с немодифицированными цеолитами. В исследованиях было выявлено, что адсорбционные свойства цеолитов X и Y могут быть существенно улучшены за счет модификации их катионного состава [16].

В настоящем исследовании изучены сорбционные свойства композитных сорбентов, полученных методом модификации цеолита 5A оксидом магния и оксидом натрия. Проведен анализ их физико-химических характеристик и эффективности в процессе адсорбции CO_2 , а также оценена их циклическая стабильность.

Материалы и методы исследования.

Материалы

Цеолит 5A, предоставлен компанией Jiuzhou Chemicals Co. (Шанхай, Китай). Для синтеза композитных сорбентов применяли карбонат натрия (Na_2CO_3) и нитрат магния ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$) аналитической чистоты, поставленные Sigma-Aldrich (США). Адсорбционные эксперименты проводились с использованием газов высокой чистоты: диоксида углерода (99,98%) и гелия (99,99%), предоставленных ТОО «Ихсан Техногаз» (Алматы, Казахстан).

Синтез композитных сорбентов

Композитные сорбенты с содержанием 5-15 мас.% $\text{Na}_2\text{O}/5\text{A}$ и 5-15 мас.% $\text{MgO}/5\text{A}$ были синтезированы методом капиллярной пропитки цеолита 5A (удельная площадь поверхности $S = 120 \text{ м}^2/\text{г}$, размер частиц $d \sim 2 \text{ мкм}$) водными растворами нитрата магния и карбоната натрия. Пропитка осуществлялась по влагеёмкости носителя. После пропитки образцы подвергались термообработке в муфельной печи: сначала при температуре $300 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 часов, затем при $500 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 3 часов для разложения нитрата магния ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$) и карбоната натрия (Na_2CO_3) с образованием соответствующих оксидов.

Тестирование композитных сорбентов

Синтезированные композитные сорбенты были испытаны в проточной установке для определения адсорбционных свойств по диоксиду углерода. Во время улавливания газ CO_2 и балансовый газ He (гелий) через слой стекла с постоянной скоростью 15 мл/мин, контролируемой встроенным расходомером. Газы проходили в реактор, который был заполнен 2 мл сорбентом. Адсорбцию диоксида углерода на композитных сорбентах проводили при температуре $500 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 мин. Температуру в реакторе контролировали термопарой, размещенной в центре слоя сорбента, управление и регулирование которой осуществляются с помощью терморегулятора («ВАРТА» Литва). Когда концентрация CO_2 в выходящем газе совпадала с концентрацией исходного газа CO_2 на входе, состав газа меняли на чистый гелий для удаления газообразного CO_2 из реактора. Далее при $750 \text{ }^\circ\text{C}$ проводили десорбцию CO_2 с композитного сорбента в течение 30 мин. Эффективность циклической сорбции была проверена с использованием 10 циклов адсорбции/десорбции. Процесс адсорбции/десорбции CO_2 проводили при $500 \text{ }^\circ\text{C}$ в 99,99 об.% CO_2 (15 мл/мин) в течение 30 мин и $750 \text{ }^\circ\text{C}$ в 99,99 об.% гелия в течение 30 мин. Выходящие газы

анализировали с помощью газового хроматографа Хромос GX-1000, оснащенного детектором по теплопроводности (ДТП). Перед проведением экспериментов по улавливанию CO_2 сорбенты дополнительно сушили при 120°C в течение 30 минут для удаления остатков влаги.

Физико-химические характеристики образцов

Физико-химические характеристики сорбентов проводили с использованием методов рентгеновской дифракции и ИК-спектроскопии.

Исследования по определению фазового состава композитных сорбентов были проведены на порошковом рентгеновском дифрактометре Drawell DW-XRD-27 mini (Cu-излучение = $1,5406$) при комнатной температуре по методу поликристалла. Для получения представительных рентгенограмм съёмка проводилась при больших временах накопления (2с) и шаге сканирования $0,02^\circ$. Используется порошковые базы данных ICDD и PDF2, проводится индентификация всех рентгенограммах с помощью программы EVA.

Регистрацию и обработку ИК-спектров проводили на ИК-Фурье спектрометре VERTEX 70 (Германия) в диапазоне частот от 4000 до 500 см^{-1} и с использованием приставки однократного нарушенного внутреннего полного отражения (НПВО) PIKE MIRacle ATR с кристаллом германия. Обработку результатов выполняли с помощью программного обеспечения OPUS 7.2.139.1294.

Результаты и обсуждение. Фазовые составы сорбентов 10 мас.% $\text{Na}_2\text{O}/5\text{A}$ и 10 мас.% $\text{MgO}/5\text{A}$ до и после реакции исследованы методом РФА (рисунок 1 и 2).

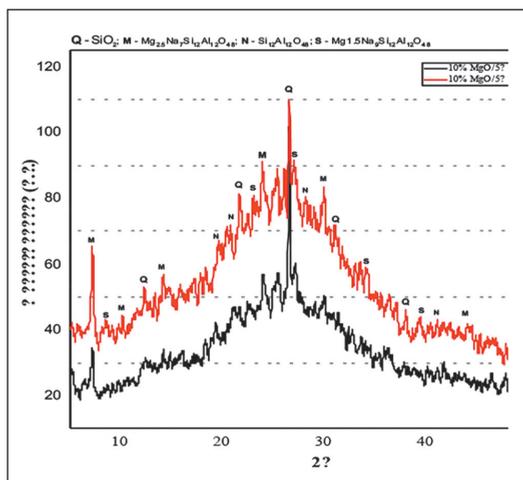


Рисунок 1 – Рентгенограммы 10 мас.% $\text{MgO}/5\text{A}$ сорбента до адсорбции и после десорбции CO_2

Для свежего сорбента 10 мас.% $\text{MgO}/5\text{A}$ наблюдаются дифракционные пики при $2\theta \approx 7,1^\circ, 8,5^\circ, 10,1^\circ, 12,3^\circ, 14,1^\circ, 19,6^\circ, 20,8^\circ, 21,6^\circ, 23^\circ, 23,9^\circ, 26,6^\circ, 27^\circ, 28,1^\circ, 30^\circ, 31,1^\circ, 34,3^\circ, 38^\circ, 39,5^\circ, 41,2^\circ, 44,2^\circ, 44,4^\circ$ и $52,5^\circ$. Пики в области $2\theta \approx 7,1^\circ - 14,1^\circ$ указывают на упорядоченную кристаллическую структуру цеолита 5A, что характерно для алюмосиликатных материалов.

Дифракционный пик при $2\theta \approx 26,6^\circ$ соответствует фазе оксида кремния (SiO_2), который является частью алюмосиликатной матрицы цеолита. Пики в диапазоне 2θ

≈ 30–34,3° связаны с магний-натрий-алюмосиликатной фазой $Mg_{2.5}Na_7Si_{12}Al_{12}O_{48}$, $Mg_{1.5}Na_9Si_{12}Al_{12}O_{48}$ что свидетельствует о модификации цеолитной структуры.

После десорбции CO_2 появляются новые дифракционные пики в области $2\theta \approx 30,5^\circ, 36,2^\circ$ и $38,5^\circ$ появляются пики, характерные для карбоната магния ($MgCO_3$), что указывает на химическое связывание CO_2 с MgO . Пик при $2\theta \approx 26,6^\circ$, связанный с оксидом кремния (SiO_3), сохраняет свою интенсивность, что свидетельствует о стабильности алюмосиликатной матрицы цеолита 5A. Интенсивность пика MgO при $2\theta \approx 38^\circ$ заметно снижается, что подтверждает его частичное преобразование в карбонатные соединения.

Для свежего образца 10 мас.% $Na_2O/5A$ наблюдаются дифракционные пики при $2\theta \approx 17,7^\circ, 20,5^\circ, 21,2^\circ, 23,1^\circ, 27,2^\circ, 29,7^\circ, 31^\circ, 31,5^\circ, 34,8^\circ, 37,5^\circ, 38,4^\circ, 39^\circ, 42,7^\circ, 43,2^\circ, 45,5^\circ, 47^\circ$ и 52° , что соответствует алюмосиликатной основе цеолита 5A и натрийсодержащим фазам, таким как $Na(AlSiO_4)$.

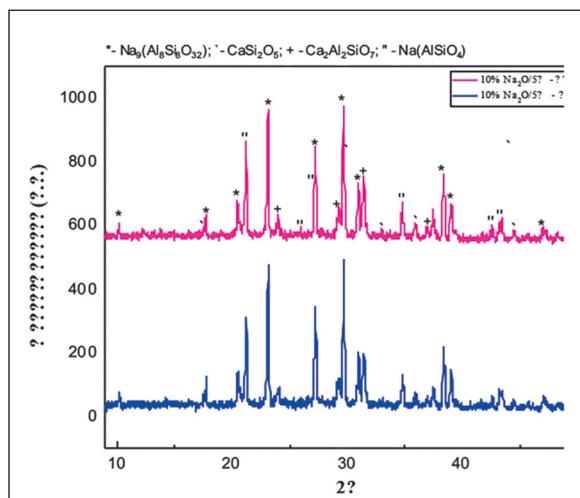


Рисунок 2 – Рентгенограммы 10 мас.% $Na_2O/5A$ сорбента до адсорбции и после десорбции CO_2

Интенсивные пики в диапазонах $2\theta \approx 23,1^\circ$ и $27,2^\circ$ указывают на кристаллическую матрицу цеолита. Пик при $2\theta \approx 29,7^\circ$ подтверждает присутствие фаз, характерных для натрийсиликатов. После десорбции CO_2 наблюдается снижение интенсивности пиков цеолита и увеличение интенсивности пиков, характерных для Na_2CO_3 , что свидетельствует о химическом связывании CO_2 с образованием карбонатных фаз. При этом структура алюмосиликатной матрицы сохраняет стабильность, подтвержденную неизменной интенсивностью пиков в диапазоне $2\theta \approx 20,5^\circ-27,2^\circ$.

Методом ИК-Фурье спектроскопии было исследовано наличие функциональных групп на поверхности сорбентов 10 мас.% $MgO/5A$ и 10 мас.% $Na_2O/5A$ до и после реакции (рисунок 3 а, б). ИК-Фурье спектры сорбентов полосы поглощения находятся в диапазоне $500-4500\text{ см}^{-1}$.

Результаты ИК-спектроскопии сорбента 10 мас.% $MgO/5A$ до адсорбции показали наличие характерных полос поглощения в диапазонах 640, 1006, 1136, 1355,

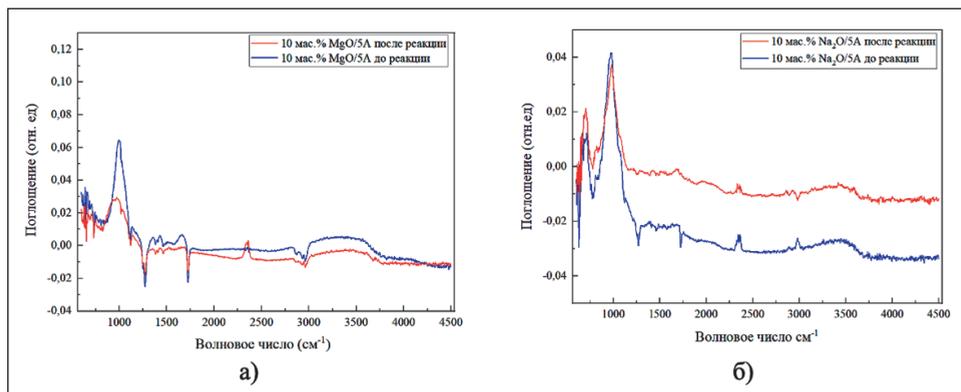


Рисунок 3 – ИК спектры сорбентов: а) 10 мас.% MgO/5A до адсорбции и после десорбции CO₂; б) 10 мас.% Na₂O/5A до адсорбции и после десорбции CO₂

1423, 1664 и 3321 см⁻¹. Полоса в области 970-1006 см⁻¹ указывает на валентные колебания связей Mg–O, подтверждающие присутствие фазы MgO. Полоса при 640 см⁻¹ связана с симметричными растяжениями внутренних тетраэдров (Si, Al)–O в структуре цеолита 5A, соответствующими алюмосиликатной матрице. П.п при 1008 см⁻¹ относится к асимметричным валентным колебаниям внутренних тетраэдров (Si, Al)–O или скелетным связям между тетраэдрами. В области 3300–3400 см⁻¹ наблюдается интенсивная полоса поглощения, которая соответствует валентным колебаниям гидроксильных групп (–OH), что указывает на присутствие адсорбированной воды на поверхности сорбента [17]. В диапазоне 1400–1500 см⁻¹ обнаружены слабые полосы, характерные для алюмосиликатной матрицы цеолита 5A. Эти полосы связаны с вибрациями Si–O и Al–O связей алюмосиликатного каркаса.

На ИК-спектрах 10 мас.% MgO/5A после десорбции CO₂ были зафиксированы следующие изменения: усиление полосы поглощения при 2360 см⁻¹, что связано с присутствием молекул углекислого газа, адсорбированных внутри пор сорбента. Это характерно для углекислого газа, удерживаемого в микропорах алюмосиликатных материалов. В области 900–1000 см⁻¹ наблюдается снижение интенсивности полос Mg–O, что указывает на частичный переход MgO в карбонатную фазу. Образование карбонатов подтверждается появлением новых полос, характерных для MgCO₃, что согласуется с данными [18].

Для сорбента 10 мас.% Na₂O/5A до реакции также зафиксированы полосы в диапазонах 950-1200 см⁻¹ (валентные колебания Si–O–Si и Al–O–Si), 1400-1650 см⁻¹ (характерными для карбонатных групп (CO₃²⁻) и 3400-3600 см⁻¹ (валентные колебания O–H групп). После реакции в области 1400-1650 см⁻¹ наблюдалось появление интенсивных полос, связанных с образованием карбонатов натрия (Na₂CO₃), что подтверждает взаимодействие оксида натрия с CO₂.

Тестирование сравнительной сорбционной ёмкости сорбентов в процессе улавливания CO₂ были проведены при условиях процесса: температура адсорбции CO₂ -500 °С, время адсорбции 30 минут, температура десорбции 750 °С. Полученные результаты представлены на рисунке 4.

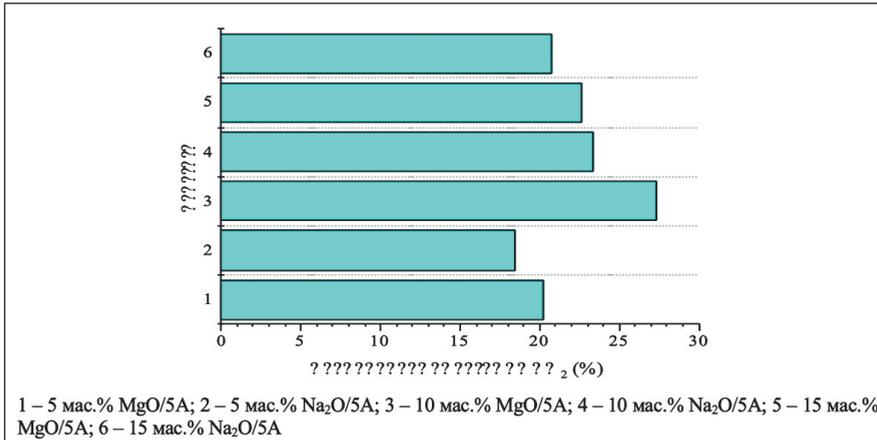


Рисунок 4 – Влияние содержания оксидов натрия и магния на сорбционную емкость по CO₂ композитных сорбентов

Как видно из *рисунка 4*, варьирование содержания оксидов магния и натрия на носителе 5A от 5 до 15 мас.% приводит к снижению сорбционной емкости композитных сорбентов по CO₂. Наибольшая сорбционная емкость наблюдается на сорбентах с содержанием оксидов магния и натрия в количестве 10 мас.%. Для 10 мас.% MgO/5A сорбционная емкость по CO₂ составила 27,3%, а для 10 мас.% Na₂O/5A - 23,4%.

Для определения стабильности работы в процессе сорбции диоксида углерода сорбенты 10 мас.% MgO/5A и 10 мас.% Na₂O/5A были исследованы при температуре адсорбции 500 °С, десорбции CO₂ при 750 °С. Полученные результаты представлены на *рисунке 5*.

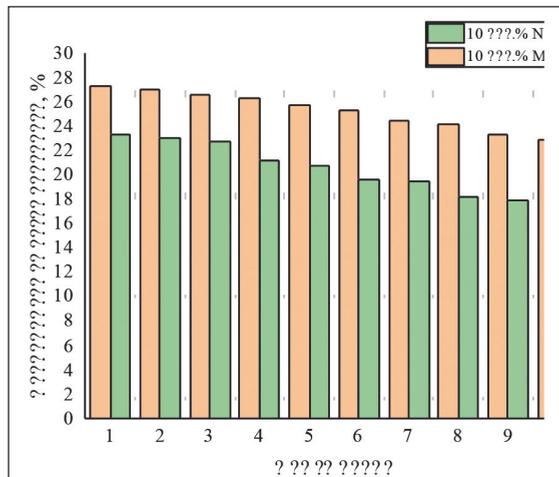


Рисунок 5 – Цикличность улавливания сорбентами CO₂ при температуре 500 °С

Результаты показали, что наблюдается постепенное снижение сорбционной емкости сорбентов: для 10 мас.% MgO/5A емкость снизилась с 27,3% до 26,0%, а для 10 мас.% Na₂O/5A - с 23,4% до 17,8%.

Заключение и выводы. Таким образом, проведенное исследование подтвердило эффективность модификации цеолита 5А оксидами магния (MgO) и натрия (Na₂O) для повышения сорбционной способности по отношению к диоксиду углерода (CO₂) при высокотемпературной адсорбции. Оптимальным составом для достижения наибольшей сорбционной емкости оказалось содержание 10 мас.% активных компонентов, при котором сорбционная емкость составила 27,3% для MgO/5А и 23,4% для Na₂O/5А при температуре адсорбции 500 °С.

Методы рентгенофазового анализа и инфракрасной спектроскопии выявили образование карбонатных фаз (MgCO₃ и Na₂CO₃), что подтверждает химическое взаимодействие CO₂ с активными компонентами сорбентов. Эти данные также свидетельствуют о значительных изменениях структурных характеристик сорбентов, которые способствуют улучшению их адсорбционных свойств.

Изучение циклической стабильности сорбентов показало, что снижение сорбционной емкости после 10 циклов адсорбции/десорбции было незначительным для MgO/5А (с 27,3% до 26,0%), что указывает на высокую устойчивость данного материала. В случае Na₂O/5А снижение оказалось более существенным (с 23,4% до 17,8%), что, вероятно, связано с изменением структуры или потерей активных компонентов в процессе циклического использования. Сорбенты на основе цеолита 5А, модифицированные 10 мас.% MgO и Na₂O, представляют собой перспективные материалы для применения в процессах улавливания и переработки CO₂. Однако дальнейшие исследования должны быть направлены на улучшение их стабильности, особенно для Na₂O/5А, а также на изучение эффективности работы сорбентов в реальных условиях, включая использование смеси газов и проведение долговременных испытаний. 

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерство науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках научного проекта № AP19678248

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Xu Z., Jiang T., Zhang J., et al. Anovel self-reactivated and stable MOF-derived Mg-doped CaO sorbent for high-temperature CO₂ capture // Sep. Purif. Technol. – 2025. – Vol. 359. – P. 130827. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130827>
- 2 Das A., Peu S.D., Hossain M.S., et al. Advancements in adsorption based carbon dioxide capture technologies-A comprehensive review // Heliyon – 2023. – Vol. 9. – P. 2341. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22341>
- 3 Chouikhi N., Cecilia J.A., Vilarrasa-García E., et al. CO₂ Adsorption of Materials Synthesized from Clay Minerals: A Review // Minerals. – 2019. – Vol. 9. – P.514. <https://doi.org/10.3390/min9090514>
- 4 Zhang X., Zhao H., Yang Q., et al. Direct air capture of CO₂ in designed metal-organic frameworks at lab and pilot scale // Carbon Capture Sci Technol. – 2023. – Vol. 9. – P.100145. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100145>
- 5 El Hadri N., Quang D.V., Goetheer E.L.V., Abu Zahra M.R.M. Aqueous amine solution characterization for post-combustion CO₂ capture process // Appl. Energy. – 2017. – Vol. 185. – P. 1433–1449. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.043>

- 6 Amaraweera S.M., Gunathilake C.A., Gunawardene O.H.P., et al. Carbon Capture Using Porous Silica Materials // *Nanomaterials*. – 2023. – Vol. 13. – P.2050. <https://doi.org/10.3390/nano13142050>
- 7 Liu J., Sun X., Li N., et al. Effect of synthesis conditions on the properties of 13X zeolites for CO₂ adsorption // *Environ. Pollut. Bioavailab.* – 2024. – Vol.36. – P. 2387683. <https://doi.org/10.1080/26395940.2024.2387683>
- 8 Gopalan J., Buthiyappan A., Abdul Raman A.A. Insight into metal-impregnated biomass based activated carbon for enhanced carbon dioxide adsorption: A review // *J Ind Eng Chem.* – 2022. – Vol.113. – P. 72–95. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.06.026>
- 9 Wu H., Wang X., Wang X., Su W. Based on machine learning model for prediction of CO₂ adsorption of synthetic zeolite in two-step solid waste treatment // *Arab J Chem.* – 2024. – Vol. 17. – P.105507. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105507>
- 10 Alothman Z.A., Shahid M. Recent advances in removal of toxic elements from water using MOFs: A critical review // *Arab. J. Chem.* – 2022. – Vol. 15. – P.104319. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104319>
- 11 Gao F., Wang S., Chen G., et al. A facile approach to the fabrication of MgO@Y composite for CO₂ capture // *Adsorption.* – 2020. – Vol. 26. – P. 701–709. <https://doi.org/10.1007/s10450-019-00147-w>
- 12 Bekhti H., Bouchafaa H., Melouki R., et al. Adsorption of CO₂ over MgO–Impregnated NaYzeolites and modeling study // *Microporous Mesoporous Mater.* – 2020. – Vol. 294. – P.109866. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.109866>
- 13 Li M. Dynamics of CO₂ adsorption on sodium oxide promoted alumina in a packed-bed reactor // *Chem Eng Sci.* – 2011. – Vol. 66. – P. 5938–5944. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.08.013>
- 14 Kodasma R., Feroso J., Sanna A. Li-LSX-zeolite evaluation for post-combustion CO₂ capture. *Chem Eng J.* – 2019. – Vol. 358. – P.1351–1362. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.063>
- 15 Yang S-T., Kim J., Ahn W-S. CO₂ adsorption over ion-exchanged zeolite beta with alkali and alkaline earth metal ions // *Microporous Mesoporous Mater.* – 2010. – Vol. 135. – P. 90-94. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2010.06.015>
- 16 D'Alessio D., Tribaudino M., Mezzadri F. et al. Degassing and phase transitions with temperature in melanophlogite // *Microporous Mesoporous Mater.* – 2019. – Vol. 286. – P. 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.05.030>
- 17 Hu T., Gao W., Liu X., et al. Synthesis of zeolites Na-A and Na-X from tablet compressed and calcinated coal fly ash // *R. Soc. Open Sci.* – 2017. – Vol. 4. – P.170921. <https://doi.org/10.1098/rsos.170921>
- 18 Choi S-B., Kim N-W., Lee D-K., Yu H. Growth Mechanism of Cubic MgO Granule via Common Ion Effect // *J. Nanosci. Nanotechnol.* – 2017. – Vol. 13. – P.7577–7580. <https://doi.org/10.1166/jnn.2013.7882>